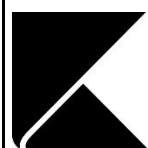


KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Niko Suni

MOOTTOREIDEN KÄYNNISTYSVIRTOJEN VAIKUTUKSET TEOLLISUUS-
SÄHKÖVERKOSSA

Opinnäytetyö
Toukokuu 2015



Karelia
AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2015
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
p. (013) 260 600

Tekijä
Niko Suni

Nimeke
Moottoreiden käynnistysvirtojen vaikutukset teollisuussähköverkossa

Toimeksiantaja
Efora Oy

Tiivistelmä

Työssä oli tarkoituksena tutkia Enocell Oy:n sellutehtaan keittämön kahden 690 voltin moottorikeskuksen sähkönlaatua ja tutkia mittaustietojen perusteella keskusten sisältä ja keskuksia syöttävistä kiskoista usein kuuluvaa lyhytaikaisen rämisvän äänen sähköisiä syitä. Äänen aiheuttajaksi epäiltiin keskusten moottoreiden suurten käynnistysvirtojen aiheuttamaa sähkökiskojen värähtelyä, joka voisi pahimmillaan johtaa kiskojen vaurioitumiseen ja oikosulkuun. Toisena tavoitteena työssä oli pohtia keinoja tuon rämisvän äänen poistamiseksi, mikäli äänen syyksi varmistuu sähköinen syy, joka voisi jatkuessaan aiheuttaa vikaantumisia.


Marras- joulukuun vaihteessa 2014 suoritetuissa mittauksissa tutkittiin keskusten sähkönlaatua erityisesti moottorinkäynnistystilanteissa keskusten jännitteen, virran, harmonisten yliaaltojen ja loistehon suhteen. Mittauksien perusteella havaittiin suurimpien keskusten kuormana olevien moottoreiden ottavan käynnistyshetkellä keskuksesta lähes kahdeksan kiloampeerin huippuvirran ja samalla keskusten pääjännite tekee noin 62 voltin jännitekuopan.

Muita sähköisiä syitä keskuksista kuuluvalla räminälle ei löytynyt, mutta täyttä varmuutta räminän haitallisuudesta keskuksille ei tässä työssä saavutettu. Mitattu jännitekuoppa pysyi standardien sallimissa rajoissa eikä siten aiheuta syitä toimenpiteille. Johtopäätöksenä päädyttiin kuitenkin tulokseen, että keskuksille käynnistysvirroista aiheutuvan mekaanisen rasituksen saa poistettua parhaiten asentamalla keskusten suurimpiin moottorilähtöihin pehmokäynnistimet pienentämään käynnistysvirtoja.

Kieli
suomi

Sivuja 36

Asiasanat
oikosulkumoottori, sähkökeskus, virtakisko, käynnistysvirta

 Karelia UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	THESIS May 2015 Degree Programme in Electrical Engineering Karjalankatu 3 80200 JOENSUU FINLAND tel. 358-13-260 600	
Author (s) Niko Suni		
Title Effects of Electrical Motor Inrush Currents on Industrial Electrical Network Commissioned by Efora Oy (Ltd)		
Abstract <p>The goal of this thesis was to measure the quality of electricity in two 690 volt engine switchboards in Enocell Pulp Mill and, based on measurements, to inspect the source of vibrating sounds heard coming from inside the switchboards and feeding bus ducts. The sounds were believed to be generated from bus bar vibrations when starting the engine takes large inrush current form the switchboard. Such vibrations could in the worst case cause damage to bus bars and cause short circuit. Another goal of this thesis was to find a way to eliminate the vibrating noise from the switchboard should it be confirmed to be caused by electrical cause and be harmful to bus bars.</p> <p>In November and December 2014 measurements were made to measure the quality of electricity in switchboard in terms of voltage, current, harmonic distortions and reactive power. The measurements showed that the inrush current of biggest motors peaked at eight kilo amperes while the voltage of switchboard dipped 62 volts at the same time.</p> <p>Other possible causes for the vibrating noise were not found, but it remained uncertain if the vibration could actually cause damage to the switchgear or bus ducts. The voltage dip remained within standard limits so that caused no need for action. However, it was concluded that the best way to ease the mechanical stress caused by inrush currents was to install soft starters to most powerful motors to reduce inrush currents.</p>		
Language Finnish		Pages 36
Keywords induction motor, switchboard, bus bar, inrush current		

Sisältö

1	Johdanto	6
2	Työn lähtökohdat	6
2.1	Enocell	6
2.2	Tehtaan sähkönjakelu	6
2.3	Tutkittavat keskuksat	7
3	Mittausten valmistelu	10
3.1	Mittauksen tavoitteet ja mitattavien suureiden määrittely	10
3.2	Keskusten oikosulkuimpedanssien laskenta	10
4	Mittaukset	15
4.1	Mittausten toteutus	15
4.2	Ensimmäinen mittaus	15
4.3	Ensimmäisen mittauksen tulokset	16
4.4	Kolmivaiheiset mittaukset	22
5	Mittautuloksien tulkinta	24
5.1	Huippuvirrat	24
5.2	Käynnistysvirtapiikit	26
5.3	Jännitteenalenemat	28
5.4	Särovirrat	30
5.5	Virtapiikkejä aiheuttavat moottorit	32
6	Johtopäätökset	32
6.1	Käynnistysvirtojen vaikutukset	32
6.2	Vaikutukset kiskostoihin	33
6.3	Käynnistysvirran rajoittaminen pehmokäynnistimillä	33
6.4	Pehmokäynnistimien haittapuolet	34
6.5	Pohdinta	35
	Lähteet	36

Käytetyt käsitteet ja lyhenteet

+641E342

Keskustunnus [1]:

- Kolme ensimmäistä merkkiä muodostavat linjatunnuksen, tässä tapauksessa +641 tarkoittaa keittämö 2:ta.
- Seuraava merkki kertoo jännitteen ja käyttökohteen, E tarkoittaa 690 voltin prosessisähköistystä.
- Viimeiset kolme numeroa ovat juoksevia numeroita

+641TE343

Muuntajatunnus [1]:

- Vastaava merkintätapa kuin keskustunnuksen kanssa, lisäksi on kirjain T käyttökohdetta ilmaisevan kirjaimen edellä ilmoittamassa merkinnän viittaavan muuntajaan.

THDr%

Kokonaisharmoninen särö prosentteina suureen tehollisarvon suhteen

1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Enocell Oy:n kahden keittämön sähkökeskuksen sähkön laatua ja sen osuutta keskusten suurten moottorikuormien käynnistyessä keskuksista ja sen syöttökiskoista kuuluvaan värähtelevään ääneen. Äänen oletettiin alun perin johtuvan sähkökeskusten kiskojen värähtelystä suurten moottoreiden käynnistysvirtojen seurauksena. Samalla työssä tarkasteltiin suurimpien moottoreiden käynnistysvirtojen mahdollisia muita vaikutuksia keskuksiin ja niiden syöttämiin moottoreihin ja arvioitiin tarvetta toimenpiteille moottoreiden käynnistysvirtapiikkien rajoittamiseksi.

2 Työn lähtökohdat

2.1 Enocell

Stora Enson Enocellin sellutehdas sijaitsee Joensuun kaupungin Uimaharjun taajamassa. Päätuotteina tehtaalla ovat havu- ja lehtipuista jalostettavat sulfaattiselluloosalaadut. Tehtaan kapasiteetti on 500 000 tonnia havuselluloosaa vuodessa. Selluloosan lisäksi tehdas tuottaa sivutuotteina mäntyöljyä, tärpättiä ja sähköä keskimäärin 20 MW:n teholla yli oman tarpeen. [2; 1].

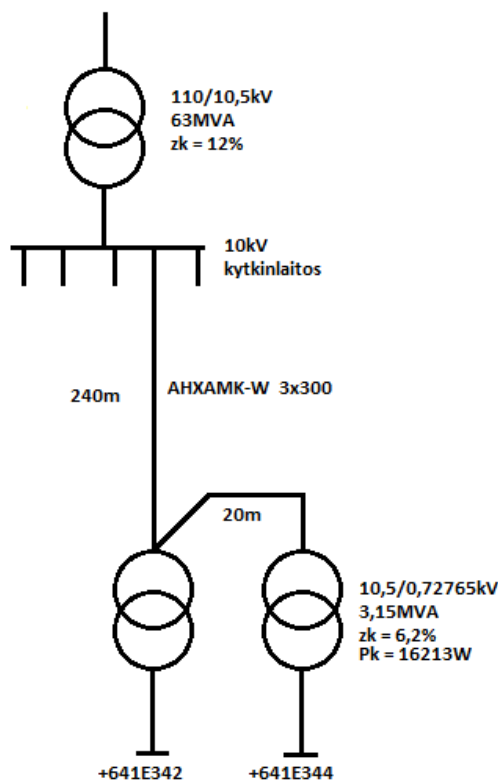
2.2 Tehtaan sähkönjakelu

Sähkönjakelu tehtaalla on toteutettu kolmesta suunnasta tulevilla 110 kV:n voimajohdoilla syötettävästä Fingrid Oy:n Uimaharjun kytkinlaitoksen kautta [1]. Kytkinlaitokselta lähtee kaksi maakaapelisyöttöä tehtaan kahdelle päämuuntajalle, jotka alentavat jännitteen tehtaalla käytettävään 10 kV:n jakelujännitteeseen. Tehtaan generaattorin tuottama sähkö tuodaan jännitettä nostavan blokkimuutajan kautta 110 kV:n kytkinlaitokselle. [3].

Vanhempi 20 MVA:n päämuuntaja 1 syöttää tehtaan normaalin käynnin aikana vanhan 10 kV:n kytkinlaitoksen +724C350 toista kiskostoa. Uudempi 63 MVA:n päämuuntaja 2 syöttää tehtaan uuden 10 kV:n kytkinlaitoksen +724C364 lisäksi vanhan kytkinlaitoksen toista kiskostoa. Kymmenen kilovoltin kytkinlaitoksilta syötetään tehtaan viittäkymmentä jakelumuuntajaa. Tarvittaessa päämuuntaja 2:n teho riittäisi syöttämään kaiken tehtaan tarvitseman sähköenergian. [1; 3].

2.3 Tutkittavat keskukset

Työn kohteena olevat kaksi keskusta syöttävät tehtaan keittämön moottoreita, jotka eivät tarvitse taajuusmuuttajaohjauksia. Taajuusmuuttajakäytön tarvitsevia moottoreita varten on oma taajuusmuuttajakeskus tehdasverkon yliaaltopitoisuuden pitämiseksi kustannustehokkaissa rajoissa [4]. Kuvassa 1 on esiteltynä keskusten virransyöttö päämuuntajan yläjännitepuolelta syöttömuuntajien alajännitepuolelle [3].



Kuva 1) Tarkasteltavien keskusten sähkönsyöttö päämuuntaja 2:lta keskusten syöttöpisteisiin

Kuvan 1 mukaisesti tarkasteltavat keskuksat saavat syöttönsä uudelta päämuuntajalta 2:n syöttämältä 10 kV:n kytkinlaitokselta +724C364 yhteistä syöttökaapelia pitkin siten, että ensimmäistä keskusta syöttävän muuntajan navoista haarautuu syöttö toista keskusta syöttävälle muuntajalle [3]. Keskuksia syöttävät 3,15 MVA:n tehoiset muuntajat alentavat jännitteen kymmenestä kilovoltista 690 V:n jännitetasolle ja keskuksat ovat liitettyinä muuntajiin virtakiskoilla. Keskuksien sähkön jakelujärjestelmänä käytetään IT-järjestelmää muita järjestelmätyyppejä paremman vikasietoisuutensa vuoksi.

Keskusten kuormina on ainoastaan moottorikuormia, moottorien koon vaihdellessa yhdestä kilowatista neljänsadan kilowatin akselitehoihin asti. Moottoreiden käynnistystapana on suora käynnistys, koska käytössä olevia 400 V:n jännitteelle rakennettua moottoria voidaan käyttää 690 V:n jännitteellä vain tähtikytkennässä. Taulukoissa 1 ja 2 on esitelty keskusten kuormana olevien moottoreiden tehot, lukumäärät ja moottorikuorman tyypit [5; 6]. Taulukoista nähdään valtaosan keskusten kuormana olevista moottoreista ja erityisesti kaikkien suurempitehoisten moottoreiden pyörittävän pumppukuormia.

Taulukko 1. Keskus +641E344:n kuormien tehot ja tyypit [5]

Moottorin teho, kW	Lähtöjen määrä	Kuorman tyyppi
1,1	1	Puhallin
7,5	1	Pumppu
22	4	Ruuvi / Puhallin
37	2	Ruuvi
75	3	Hihna / Pumppu
90	6	Pumppu
110	1	Pumppu
132	1	Pumppu
250	3	Pumppu
400	2	Pumppu

Taulukko 2. Keskus +641E342:n kuormien tehot ja tyypit [6]

Moottorin teho, kW	Lähtöjen määrä	Kuorman tyyppi
2,5	2	Pumppu
5,5	1	Pumppu
11	2	Pumppu
15	4	Pumppu
22	4	Puhallin / Pumppu
30	5	Pumppu
37	2	Ruuvi
45	2	Suodatin
75	3	Hihna / Pumppu
90	4	Pumppu
110	3	Pumppu
132	1	Pumppu
160	2	Sihti
250	2	Pumppu
315	1	Pumppu
400	1	Pumppu

Keittämön prosessin tekniikasta johtuen moni moottori käy vain satunnaisesti pumppujen siirtäessä nesteitä säiliöistä toisiin keittotapahtuman edetessä [4]. Tästä seuraa paljon vaihtelua keskusten kuormitusvirrassa ja suurempien moottoreiden käynnistymisten yhteydessä myös suurehkoja virtapiikkejä.

Työssä oli tarkoitus tutkia epäilyksiä, että suurten moottoreiden käynnistäminen suoralla käynnistyksellä aiheuttaisi keskuksissa jännitekuoppia rasittaen muita keskuksien syöttämiä moottoreita ja käynnistysvirran aiheuttama värähtely rasittaisi keskuksen kiskoja mekaanisesti.

3 Mittausten valmistelu

3.1 Mittauksen tavoitteet ja mitattavien suureiden määrittely

Moottorien käynnistymishetkillä tapahtuvia ilmiöitä lähdettiin tutkimaan sähköisien suureiden mittaamisella, josta oli tarkoitus saada selville moottorien käynnistymisen aiheuttamat suurimmat virtapiikit ja näihin virtapiikkeihin liittyvä keskuksen jännitteenalenema. Jännitteenaleneman suuruuden ollessa tiedossa voidaan sen avulla arvioida käynnistystilanteen aiheuttamaa räsistusta keskuksen muille moottoreille [7, 13]. Lisäksi käynnistysvirran ja jännitteenaleneman avulla voitiin arvioida keskusten syötön oikosulkuimpedanssi, jonka vertaaminen syöttävän verkon komponenteista laskemalla saatuun arvoon antoi tietoa, miten hyvin syöttö kestää moottoreiden käynnistymisvirran virtapiikkejä.

Muita keskuksille tehtäviä sähköisiä mittaushetkiä ovat virran ja jännitteen harmoniset säröt ja tehokertoimet, joiden avulla arvioitiin keskuksen yleistä sähköisen laadun moottorien käynnistymishetkillä, jotta voidaan arvioida kompensoinnin häiriöiden ja yliaaltojen resonoinnin mahdollisia vaikutuksia käynnistymishetkellä kiskostoista kuuluviin ääniin.

3.2 Keskusten oikosulkuimpedanssien laskenta

Mittaustulosten jännitteenaleneman arviointia ja vertailua varten laskettiin seuraavaksi keskuksia syötettävän verkon oikosulkuimpedanssi päämuuntaja kahdelta alkaen. Kuvassa 1 oli esitelty työssä tutkittavien keskusten +641E342 ja +641E344 sähkönsyöttöjärjestelmä kantaverkkoon 110 kV:n kytkinlaitokselta kytketyltä päämuuntaja 2:lta keskuksille ja muuntajien sekä syöttökaapeleiden pituudet. [3].

Päämuuntaja 2:n ja 10 kV:n kytkinlaitoksen välinen virransyöttö sekä keskuksia syöttävien jakelumuuntajien ja keskusten väliset virransyötöt on toteutettu virtakiskoilla. Näissä laskelmissa kyseisten kisko-osuuksien impedanssi oletetaan nolllaksi, koska niiden johdinpinta-aloista ei löytynyt dokumenteista mainintaa ja kiskojen pituudet ovat verrattain lyhyitä.

Muuntajien oikosulkuimpedanssi Z_k saadaan laskettua kaavalla 1.

$$Z_k = \frac{U_n^2}{S_n} * z_k \quad (1)$$

jossa U_n = muuntajan nimellisjännite tarkasteltavalla jännitetasolla.

S_n = muuntajan nimellisteho

z_k = muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi

Päämuuntaja 2:n oikosulkuimpedanssi 10,5 kV:n jännitetasolla tällöin on

$$Z_k = \frac{(10\,500\text{ V})^2}{63\,000\,000\text{ VA}} * 0,12 = 0,21\ \Omega \quad (2)$$

Jakelumuuntajien vastaavat oikosulkuimpedanssit 10,5 kV:n jännitetasolla ovat

$$Z_k = \frac{(10\,500\text{ V})^2}{3\,150\,000\text{ VA}} * 0,062 = 2,17\ \Omega \quad (3)$$

Muuntajan oikosulkuresistanssi R_k lasketaan kaavalla 4.

$$R_k = \frac{P_k}{3I_n^2} \quad (4)$$

jossa P_k = muuntajan kuormitushäviöt nimelliskuormalla

I_n = muuntajan nimellinen kuormitusvirta

Jakelumuuntajien oikosulkuresistanssi 10,5 kV:n jännitetasolla on tällöin

$$R_k = \frac{16213 \text{ W}}{3 \cdot (173,2 \text{ A})^2} = 0,18 \Omega \quad (5)$$

Muuntajan oikosulkureaktanssi X_k voidaan laskea impedanssin ja resistanssin ollessa tiedossa kaavalla 6.

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (6)$$

Jakelumuuntajien oikosulkureaktanssi 10,5 kV:n jännitetasolla on

$$X_k = \sqrt{(2,17 \Omega)^2 - (0,18 \Omega)^2} = 2,16 \Omega \quad (7)$$

Päämuuntajan impedanssin voidaan laskennan kannalta katsoa olevan puhtaasti reaktiivinen. Keskuksia syöttävien muuntajien syöttökaapeloinnin impedanssin laskemista varten haettiin valmistajan sivuilta käytetyn kaapelin ominaisuudet, jotka ovat esiteltyinä taulukossa 3 [8].

Taulukko 3. AHXAMK-W 3x300 syöttökaapelin ominaisuudet [8]

$R = 0,12 \Omega/\text{km}$	$L = 0,32 \text{ mH}/\text{km}$
-----------------------------	---------------------------------

Lasketaan näiden taulukossa esitettyjen ominaisuuksien ja kuvassa 1 esitettyjen kaapelipituuksien avulla syöttökaapelin impedanssi pidemmällä syöttökaapeloinnilla varustetun keskuksen +641E344:n syöttömuuntajalle:

$$R = \frac{0,12 \Omega}{km} * 0,260 km = 0,0312 \Omega \quad (8)$$

$$L = \frac{0,32 mH}{km} * 0,260 km = 0,0832 mH \quad (9)$$

Lasketaan induktanssin pohjalta kaapelin induktiivinen reaktanssi, joka lasketaan kaavalla 10.

$$X_L = L * 2 * \pi * f \quad (10)$$

jossa f = taajuus

$$X_L = 0,0000832 H * 2 * \pi * 50 Hz = 0,026 \Omega \quad (11)$$

Kokonaisimpedanssi päämuuntajalta keskukselle 10,5 kV:n jännitetasolla lasketaan tällöin

$$X_L = X_{Päämuuntaja2} + X_{kaapeli} + X_{Jakelumuuntaja} = 2,396 \Omega \quad (12)$$

$$R = R_{kaapeli} + R_{Jakelumuuntaja} = 0,2112 \Omega \quad (13)$$

Redusoidaan impedanssilukemat 690 V jännitetasolle kaavalla 14.

$$Z' = \frac{Z}{\mu^2} \quad (14)$$

jossa Z' = redusoitu impedanssi

μ = muuntajan muuntosuhde

Muuntosuhde lasketaan muuntajien ylä- ja alajännitteiden suhteesta kaavalla 15.

$$\mu = \frac{U_{ylä}}{U_{ala}} = \frac{10500 \text{ V}}{727,65 \text{ V}} = 14,43 \quad (15)$$

$$X_L' = \frac{2,396 \Omega}{14,43^2} = 0,011507 \Omega \quad (16)$$

$$R' = \frac{0,2112 \Omega}{14,43^2} = 0,001014 \Omega \quad (17)$$

Lasketaan oikosulkuimpedanssi Z redusoiduista arvoista.

$$Z = \sqrt{(0,011507 \Omega^2) + (0,001014 \Omega)^2} = 0,011551 \Omega \approx 0,01 \Omega \quad (18)$$

Laskettu impedanssi on laskentatarkkuuden rajoissa sama molemmille keskuksille, koska kaapeloinnin impedanssin osuus kokonaisimpedanssista on vain prosentin luokkaa ja keskusten välisen kaapelin pituus on alle kymmenesosa syöttökaapelin kokonaispituudesta. Mittauksien tulkinna tueksi laskettiin vielä laskennallinen keskusten oikosulkuvirta I_k , joka lasketaan seuraavasti [9].

$$I_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z} \quad (19)$$

jossa Z = kokonaisimpedanssi

$$I_k = \frac{727,65 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 0,0116 \Omega} = 36216 \text{ A} \approx 36 \text{ kA} \quad (20)$$

Päämuuntaja 2:sta syöttävän verkon oikosulkutehon jätin huomioimatta oikosulkuvirtaa laskettaessa, koska muuntaja on kytketty suoraan 110 kV:n kantaverkkoon. Kantaverkon oikosulkuteho liityntäpisteessä ei ole tiedossa ja

sen osuutta keskusten oikosulkuvirtoihin voidaan pitää merkityksettömän pieninä.

4 Mittaukset

4.1 Mittausten toteutus

Mittausten suorittamiseen käytettiin Karelia-ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriosta lainattua Fluke 435 -kolmivaihesähköön laatuanalysointia, joka kytkettiin mitattavan keskuksen mittauskojekaappiin. Kaapissa oli valmiina saatavana analysointin tarvitsema 230 V instrumenttisähköliitäntä, mittauspisteet keskuksen jännitteenmittausta varten ja keskuksen virtamuuntajalta kaapin oveen paneelivirtamittareille tulevat virtajohdot, joihin analysointin omat virtamittauspäätyt oli mahdollista kytkeä. Virran mittaaminen virtamuuntajien takaa aiheutti tosin ylimääräistä asetusten muuttamista analysointista muuntosuhteen huomioimiseksi mittauksessa. Suunnitellulla mittausjärjestelyllä analysointia voitiin kytkeä turvallisesti keskuksen tehdasprosessin ollessa normaalissa käynnissä, mikä oli olennainen vaatimus mittausten tavoitteiden saavuttamiseksi.

Muita vaatimuksia mittauksen onnistumiseksi oli riittävän pitkä mittausaika, sillä keittämön prosessisykli kestää noin viisi tuntia [4]. Kaikkien keskusten moottoreiden käynnistystapahtumien tallentuminen analysointin muistiin edellytti siis vähintään viiden tunnin mittausaika. Analysointia asetettiin tästä syystä aina suurimmalle mahdolliselle mittausajalle kuitenkin pitäen mittausresoluutio, eli aika kuinka usein analysointia tallentaa tallennusten välillä mitatut arvot muistiin, mahdollisimman lyhyenä. Käytännössä mittausjakso asetui noin kahdeksaan tuntiin mittausresoluution ollessa yksi sekunti.

4.2 Ensimmäinen mittaus

Ensimmäistä mittausaika aloitettiin suorittamaan 24.11.2014 keskukselta +641E344. Mittarin asetukset laitettiin vastaamaan keskuksen IT-

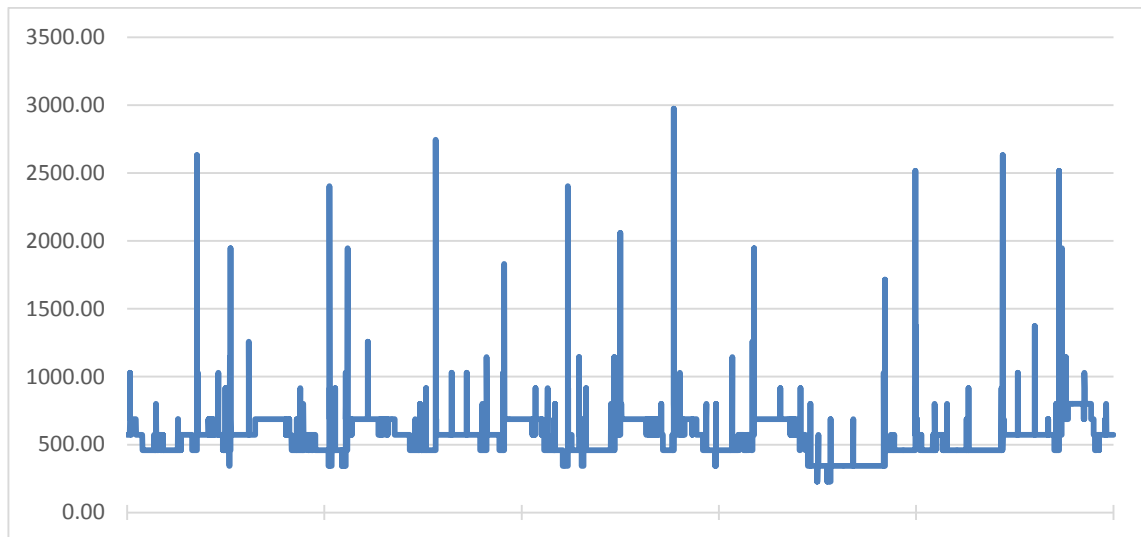
jakelujärjestelmän tyyppiä ja ottamaan huomioon virtamuuntajien muuntosuhde, jonka jälkeen tarkastettiin mittarin näyttämät jännite ja virtalukemat. Jännitelukemat vastasivat keskuksen ovelle olevan paneelimittarin näyttämää, mutta virtamittaukset heittelivät 0 A ja 800 A välillä aaltomuodon ollessa lähellä kantiaaltoa. Samaan aikaan keskuksen paneelimittarit näyttivät tasaista seitsemänsadan ampeerin kuormitusta.

Virtamittauksen epätarkkuuden selvittämiseksi mittauskytkennät purettiin keskukselta ja virtamittapäiden kytkennät tarkistettiin. Pian kuitenkin selvisi virtamittauksen heittelemisen syyksi käytetyn sähkönlaatuanalysoijan omien virtamittapäiden mittausvirhe, sillä kyseiset mittapääty on mitoitettu kolmen kiloampeerin maksimivirralla ja niillä mittaaminen keskuksen 3000/5 A virtamuuntajien takaa johti liian pieneen mittausresoluutioon.

Vaihtoehtoisia virtamittapäitä ei siihen hätään löytynyt kuin yksi kappale, joten analysoija kytkettiin keskukseseen yksivaiheisena. Tällöin myöhemmin suoritettavien kolmivaihemittauksien mittaussuureisiin voidaan tehdä muutoksia, mikäli ensimmäisessä mittauksessa olisi havaittavissa jotain, mitä en mittauksien tavoitteita laatiessani osannut ottaa huomioon. Mittaus saatiin aloitettua noin kello 15:30 ja mittaus kesti yksitoista tuntia.

4.3 Ensimmäisen mittauksen tulokset

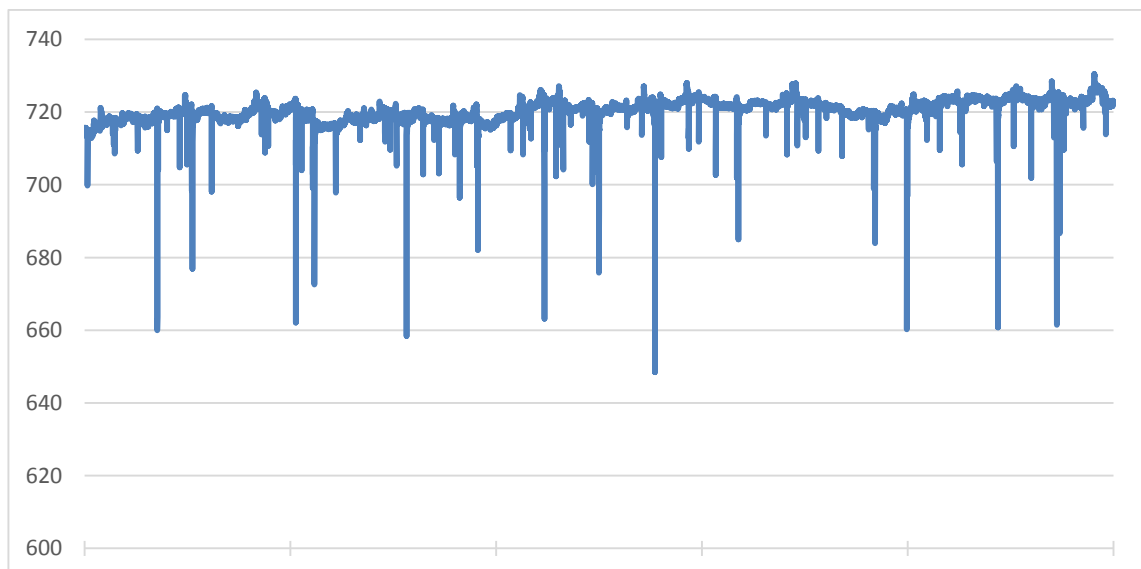
Kuvaajassa 1 on esitetty ensimmäisestä mittauksesta virtakuvaaja yhdestä vaiheesta ensimmäisiltä viideltä tunnilta. Jokainen kuvaajan piste esittää edellisen sekunnin aikana mitattua suurinta virran tehollisarvoa.



Kuvaaja 1) Virran tehollisarvon huippuarvo ampeereina

Kuvaajasta nähdään keskuksen peruskuorman pysyttelevän hieman viidensadan ampeerin alapuolella ja moottoreiden käynnistymiset aiheuttavat suurimmillaan 3 kA:n suuruisia virtapiikkejä. Keskuksen pitempiaikainen kuormavirta mittausjaksolla on enimmillään 800 A.

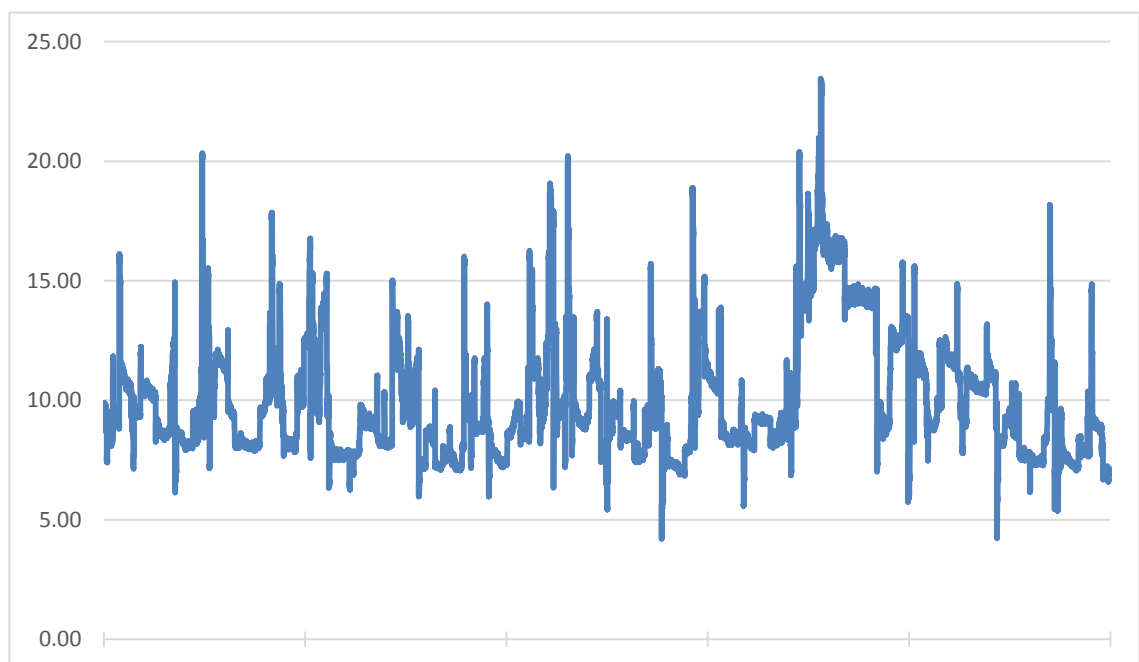
Kuvaaja 2 esittää mittauksen viiden tunnin mittausjaksolta mitattuja alimpia jännitteen tehollisarvoja. Jokainen kuvaajan piste esittää siis alinta edellisen sekunnin aikana mitattua keskuksen jännitearvoa.



Kuvaaja 2) Alin jännitteen tehollisarvo voltteina

Kuvaajasta 2 on nähtävissä jännitekuoppia, joiden ajoitus vastaa keskuksen moottorien käynnistysvirtapiikkejä kuvaajasta 1. Jännitekuoppien suuruus on suurimmilla käynnistysvirroilla noin 60 V.

Kuvaaja 3 esittää mittauksen samalta ensimmäisen viiden tunnin aikana mitattua virran keskimääräistä harmonista säröä prosenttiosuutena virran tehollisarvosta. Jokainen mittauspiste esittää edellisen sekunnin aikana mitatun harmonisen virtasärön keskiarvoa.



Kuvaaja 3) Keskimääräinen virran harmoninen särö (THDr%) prosentteina tehollisarvosta

Kuvaajasta 3:n mukaan harmonisten särövirtojen osuus keskuksen virran tehollisarvosta vaihtelee suuresti ja pysyy noin 15 %:n tuntumassa yli kaksikymmentä minuuttia neljännen mittaustunnin loppupuolella. Tarkempi vertailu harmonisen särön ja kuvaajassa 1 esitetyn keskuksen virran kesken kuitenkin osoittaa särövirran osuuden kasvavan keskuksen kokonaisvirran pienetessä, joten oletettavasti särövirran suuruus ei merkittävästi muutu kyseiselle ajanhetkelle. Asian varmistamiseksi laskin särövirran suuruuden mittausjakson aikana ja laadin siitä kuvaajan virranvaihtelujen havaitsemiseksi.

Määritellään särövirtojen tehollisarvo $I_{\text{särö}}$ seuraavasti.

$$I_{\text{särö}} = \sqrt{I_{H2}^2 + I_{H3}^2 + I_{H4}^2 + \dots I_{HN}^2} \quad (21)$$

jossa $I_{\text{särö}}$ = yliaaltovirtojen yhteenlaskettu tehollisarvo

I_{HN} = n:nnen yliaaltovirran tehollisarvo

Tällöin kokonaisharmoninen särö $THD_R\%$ voidaan määrittää seuraavasti [10].

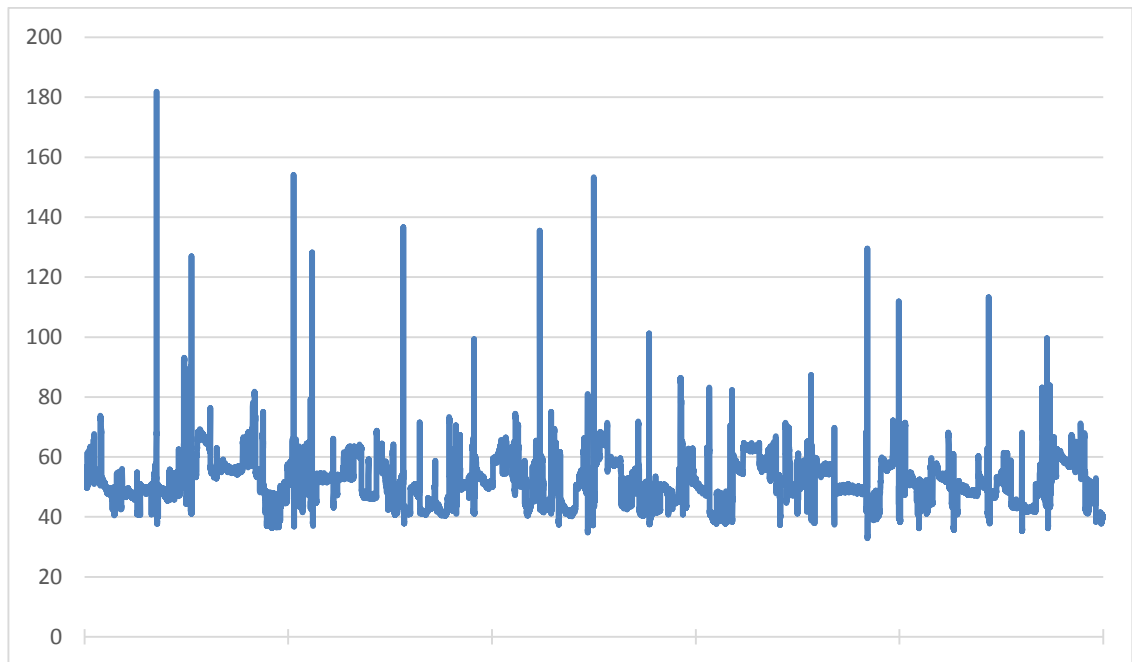
$$THD_R\% = \frac{I_{\text{särö}}}{I_{RMS}} * 100\% \quad (22)$$

jossa I_{RMS} = virran tehollisarvo

Kerrotaan kaavan molemmat puolet virran tehollisarvolla ja jaetaan molemmat puolet 100 %:lla, jolloin saadaan kaava särövirralle.

$$I_{\text{särö}} = \frac{THD_R\% * I_{RMS}}{100\%} \quad (20)$$

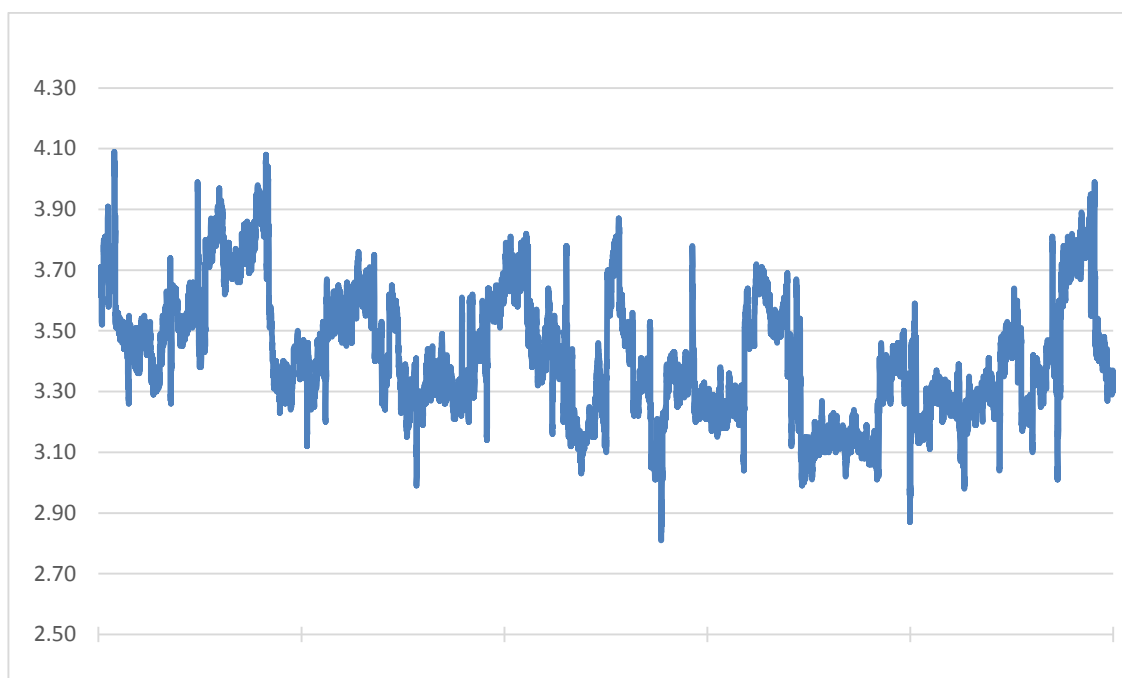
Kuvaaja 4 esittää edellä johdetulla kaavalla 20 laskettua keskimääräistä särövirtaa mittauksen viiden ensimmäisen tunnin ajanjaksolta. Jokainen kuvaajan mittapiste esittää edellisen mittaussekunnin aikana mitattua keskimääräistä tehollista särövirtaa.



Kuvaaja 4) Keskimääräinen särövirtojen tehollisarvo ampeereina

Kuvaajasta 4 saatiin varmistus edellä tekemälleni oletukselle, etteivät särövirtojen suuruudet merkittävästi muutu neljännen mittaustunnin loppupuolella. Lisäksi havaitaan, ettei särövirrassa tapahdu muitakaan muutoksia tarkastelujakson aikana lukuun ottamatta moottorien käynnistyshetkien transienttivirtapiikkejä [11].

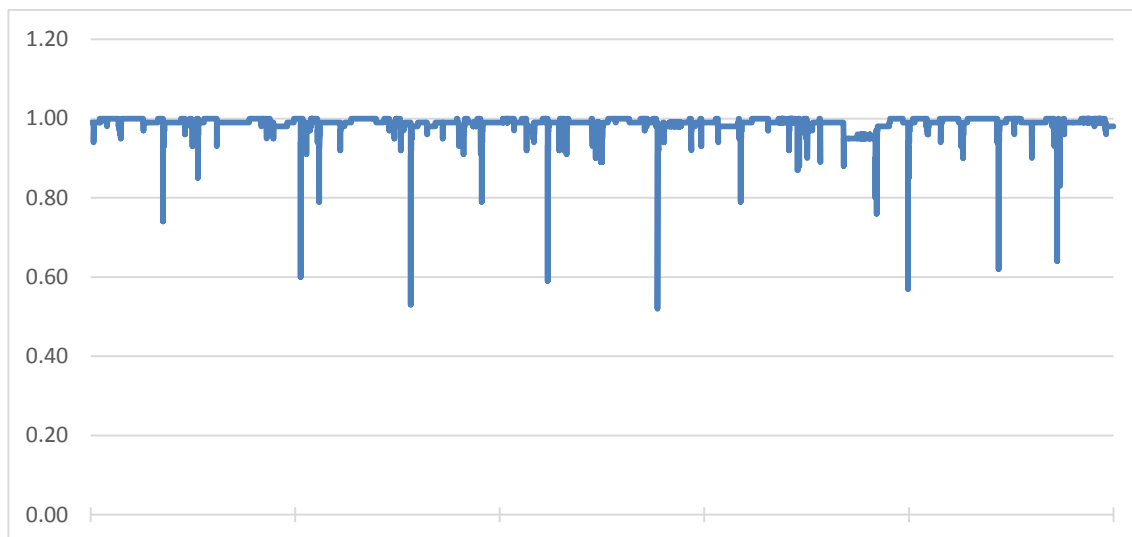
Kuvaaja 5 esittää jännitteen harmonisen särön keskiarvoa mittauksen ensimmäisiltä viideltä tunnilta. Jokainen mittauspiste kuvaa edellisen sekunnin keskimääräistä jännitesäröä.



Kuvaaja 5) Keskimääräinen jännitteen harmoninen särö (THDr%) prosentteina tehollisarvosta

Kuvaajasta 5 nähdään jännitesärön olevan varsin alhainen pysytellen puolen prosenttiyksikön tarkkuudella 3,5 %:ssa. Särö ei merkittävästi muutu mittausjakson aikana ja vertaamalla kuvaajaa virran tehollisarvon kuvaajaan 1 voidaan havaita, etteivät keskuksen kuorman muutos tai moottorien käynnistysvirtapiikit vaikuta merkittävästi jännitesärön suuruuteen.

Kuvaajassa 6 on esitetty keskuksen perustaajuisen pätötehon ja näennäistehon suhde eli tehokerroin mittauksen viideltä ensimmäiseltä tunnilta. Jokainen mittauspiste esittää edellisen sekunnin aikana mitattua keskimääräistä tehokerrointa.



Kuvaaja 6) Perustaajuinen tehokerroin

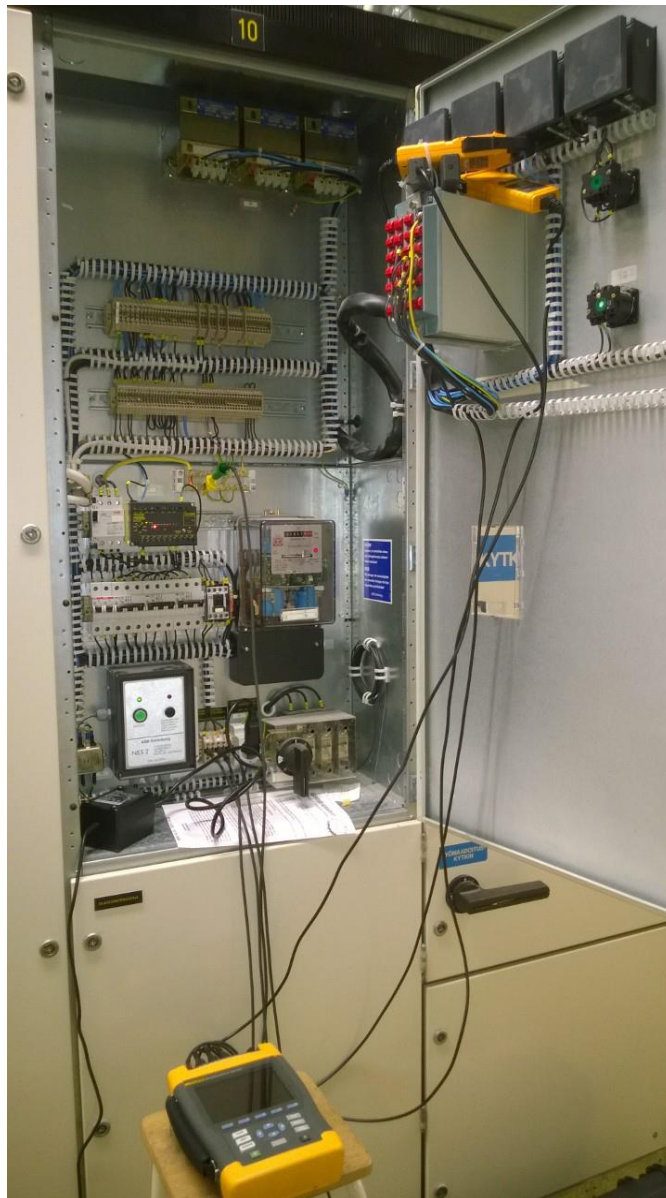
Kuvaajasta 6 nähdään tehokertoimen pysyvän koko mittausjakson lähellä yhtä lukuun ottamatta suurimpia moottoreiden käynnistymisvirtapiikkejä ja lyhyttä ajanjaksoa neljännen mittaustunnin loppupuolella. Tuolloin kuvaaja 1:n mukaan keskuksen kuormitusvirta oli alimmillaan, eikä tuolloin mitattu tehokerroin 0,95 ole erityisen alhainen.

Mittauksen tuloksista ei alustavan tutkinnan perusteella löytynyt mitään erityistä sähköistä häiriötä. Suurimpien moottoreiden ottama käynnistysvirta saa keskuksen kokonaisvirran kohoamaan hetkellisesti syöttömuuntajan nimellisvirran tasolle aiheuttaen suurimmillaan 74 V jännitekuopan keskuksessa. Koska mitään erikoista ei yksivaiheisesta mittauksesta löytynyt, en kokenut tarvetta muuttaa analysaattorin mittaussuureita komivaihemittauksia varten.

4.4 Kolmivaiheiset mittaukset

Varsinaiset komivaihemittaukset saatiin suoritettua 2.12.2014 keskukselle +641E342 ja 4.12.2014 keskukselle +641E344. Mittauksissa käytettiin Karelia-ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriosta lainattuja virtamittapihtejä, joiden mittaalue ylsi maksimissaan kymmeneen ampeeriin johtaen huomattavasti parempaan kolmivaiheiseen virranmittauksen resoluutioon.

Kuvassa 1 on esitelty kolmivaihemittauksessa olevan analysaattorin kytkentä keskuksen. Virtapihdit näkyvät kuvassa oikealla ylhäällä keskuksen ovesta olevien paneelimitarien alle nippusiteillä varmistettuina. Jännitemittausjohtimet ovat kiinnitettyinä keskuksen kaapin alaosassa sijainneisiin banaaniitinpistokkeisiin, joiden vieressä on näkyvissä mittausinstrumenttien virransyötölle tarkoitettu pistoke.



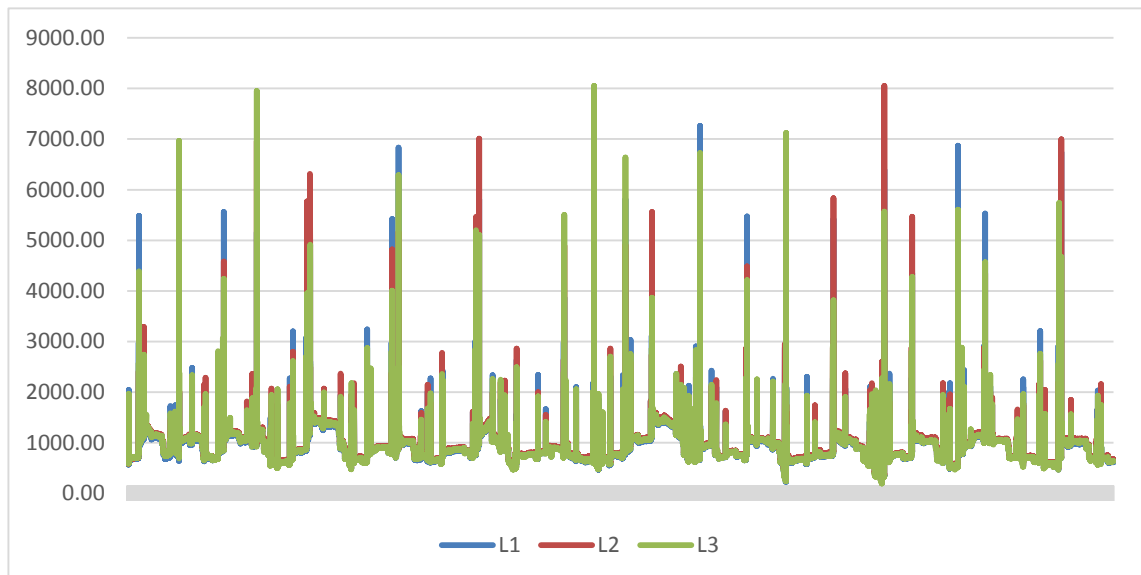
Kuva 2) Kolmivaiheiset kytkennät keskuksen mittauskaappiin

5 Mittaustuloksien tulkinta

Kolmivaiheisissa mittauksissa molempien keskusten mittaustulokset vastasivat pääpiirteittäin ensimmäisen mittauksen tuloksia, joten ensimmäisen mittauksen tulokset ja niistä tehdyt päätelmät pätevät myös kolmivaiheisten mittauksiin molemmissa keskuksissa. Seuraavissa kuvaajissa käyn läpi kolmivaiheisista mittauksista tekemiäni havaintoja.

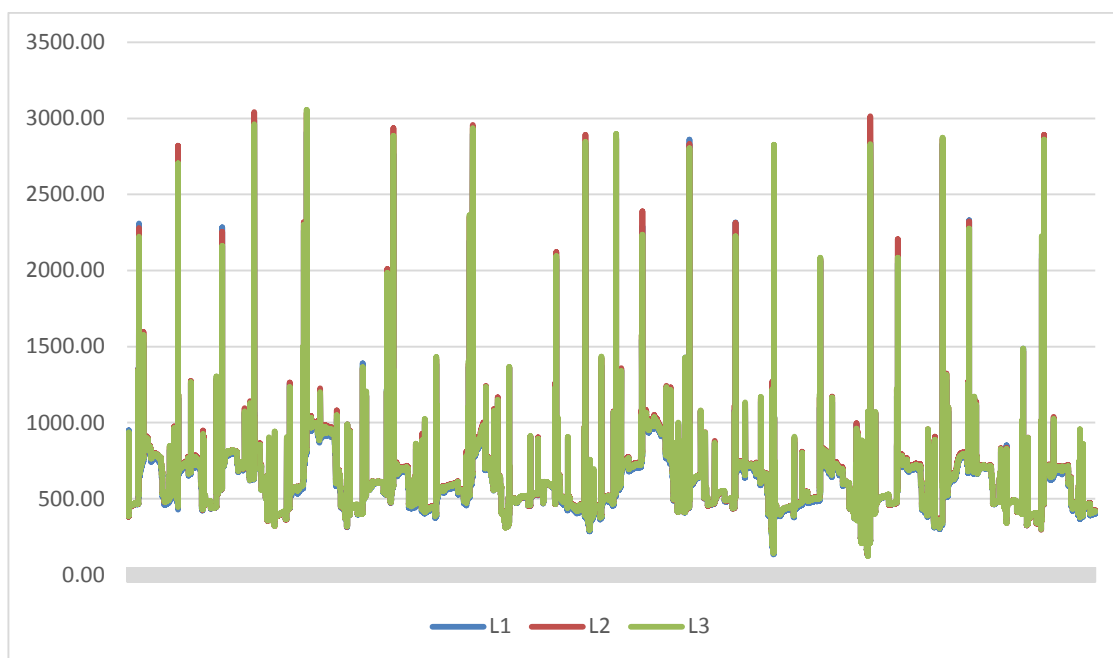
5.1 Huippuvirrat

Kuvaajassa 7 on esiteltynä keskuksen +641E344 kolmivaiheisen mittauksen virran huippuarvon kuvaaja. Jokainen kuvaajan piste esittää edellisen sekunnin aikana mitattua suurinta virran huippuarvoa mittauksen ensimmäisten kahdeksan tunnin aikana.



Kuvaaja 7) Keskukseen +641E344 kuormitusvirran huippuarvot ampeereina

Kuvaajasta nähdään heti, että eri vaiheiden huippuvirroissa on huomattavaa vaihtelua eri moottoreiden käynnistymiskertojen välillä. Verrattaessa virran huippuarvojen kuvaaja 7 saman mittausjakson virran tehollisarvon kuvaajaan 8 nähdään, etteivät vaiheiden huippuvirtojen väliset erot juurikaan vaikuta vaihevirtojen tehollisarvoihin.



Kuvaaja 8) Keskukseen +641E344 kuormitusvirran suurimmat mitatut tehollisarvot ampeereina

Toisaalta laskettaessa moottorien käynnistyshetkellä mitattujen vaihevirtojen huippuarvojen perusteella huippuvirtaa vastaava virran tehollisarvo kaavalla 21 havaitaan sen olevan 5657 A, joka on liki kaksinkertainen vastaavalla hetkellä mitattuun 3000 A:n virran tehollisarvoon. Tämä havainto tarkoittaa että moottorin käynnistyshetken huippuvirta ei ole sinimuotoista.

$$I_{RMS} = \frac{I_{pk}}{\sqrt{2}} = \frac{8000A}{\sqrt{2}} = 5657A \quad (21)$$

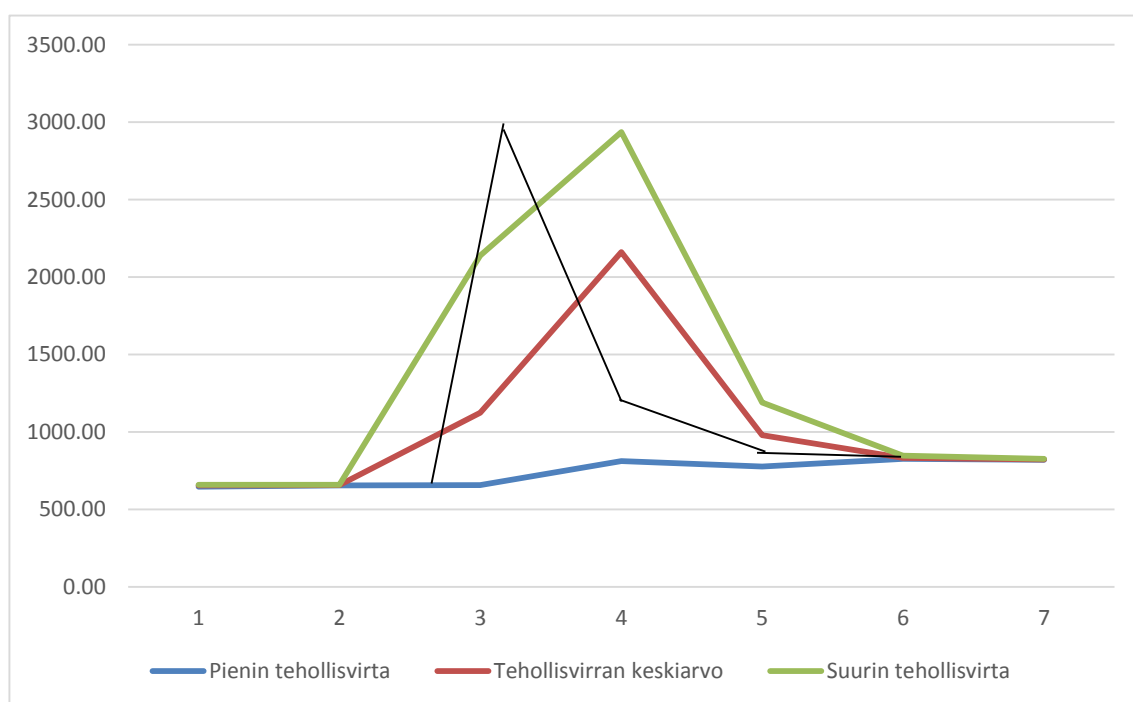
Keskukseen +641E342 mittaustulokset ovat muutoin samanlaisia, mutta siellä virran huippuarvo jää pääsääntöisesti kuuteen kiloampeeriin. Toinen oleellinen ero keskusten välillä on yli kahden kiloampeerin virtapiikin aiheuttavien moottorien käynnistysten määrä. Yhtä pitkällä mittajaksolla keskuksessa +641E342 oli 12 käynnistystä, mikä on tasan puolet vähemmän keskuksen 641E344 24:n käynnistykseen nähden.

Näiden havaintojen perusteella voidaan todeta moottoreiden käynnistyshetkellä mitatun suurimman virtapiikin kestävän huomattavasti alle yhden vaihtovirran

jakson ajan, eli kyseessä on paikallaan seisovan moottorin magnetointivirtapiikki [11].

5.2 Käynnistysvirtapiikit

Toinen tarkasteluun otettava asia on moottoreiden käynnistysvirtapiikin muoto ja kesto. Kuvaajassa 9 on esimerkki tyypillisestä keskuksen +641E344:n virran tehollisarvon kuvaajasta seitsemän sekunnin ajalta moottorin käynnistyshetkeltä yhdeltä vaiheelta muiden vaiheiden virtakuvaajien ollessa täysin samanlaisia.

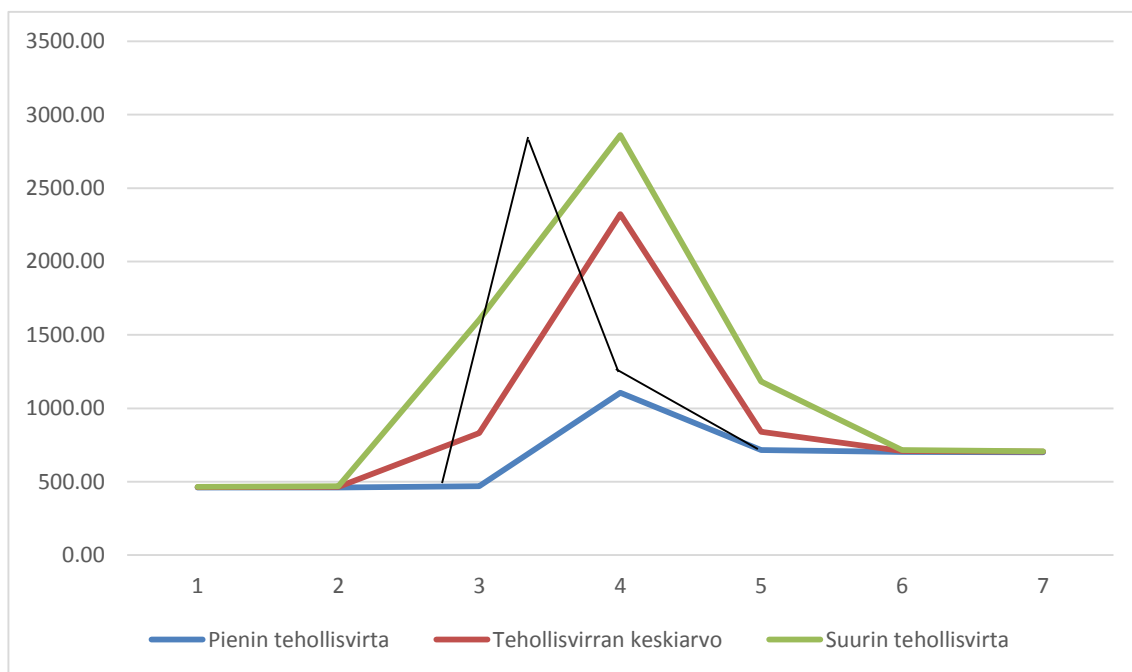


Kuvaaja 9) Esimerkki keskuksen virran tehollisarvon kuvaajasta moottorin käynnistyessä. Kuvaajan musta viiva esittää suurimman virran kuvaajan mukaan tulkitsemaani virran todellista käyrämuotoa.

Kuvaajasta 9 voidaan nähdä moottorin käynnistymishetken olevan jossain kuvaajan kolmannen pisteen mittauksen edellä, luultavasti loppupuolella koska suurin virta sattuu neljännen mittauspisteen puolelle. Vastaavasti käynnistysvirta tasoittuu jossain kuvaajan viidennen pisteen mittauksen alkupuolella, koska suurin ja pienin keskukselta mitattu virta ovat liki yhtä suuria. Moottorin käynnistysvirtapiikin kesto on siis kuvaajan perusteella 1,0–1,5 s pitkä. Näiden

havaintojen pohjalta piirsin kuvaajaan mustalla hahmotelman todellisesta virran käyrämuodosta.

Vertaamalla kuvaajan 9 pienimmän mitatun virran tehollisarvon kuvaajaa suurimman virran tehollisarvon käyrän pohjalta piirtämään mustaan virtakäyrään huomataan, etteivät käyrät kohtaa toisiaan kuvaajan pisteen neljä kohdalla. Keskuksen ottama virta on mittauksen mukaan pienentynyt pisteen 4 mittauksen aikana 800 A:iin ja kohonnut pisteen 5 mittauksen aikana takaisin 1200 A:iin. Mahdollisia selityksiä mitatulle virran vaihtelulle ovat keskuksen kiinteiden 3000/5A virtamuuntajien saturoituminen ja siitä seuraavat mittausvirheet, käynnistyvän moottorin kuorman vaihtelusta johtuva virranvaihtelu tai jonkin toisen pienemmän moottorin käynnistyminen suuremman moottorin jälkeen. Näistä vaihtoehtoista virtamuuntajien saturoituminen on kaikkein ongelmallisin saturaation vääristäessä mittauksien virtalukemia, joten tarkastellaan käynnistysvirtaa vielä toisen tyyppillisen kuvaajan 10 avulla [12, 5; 9].

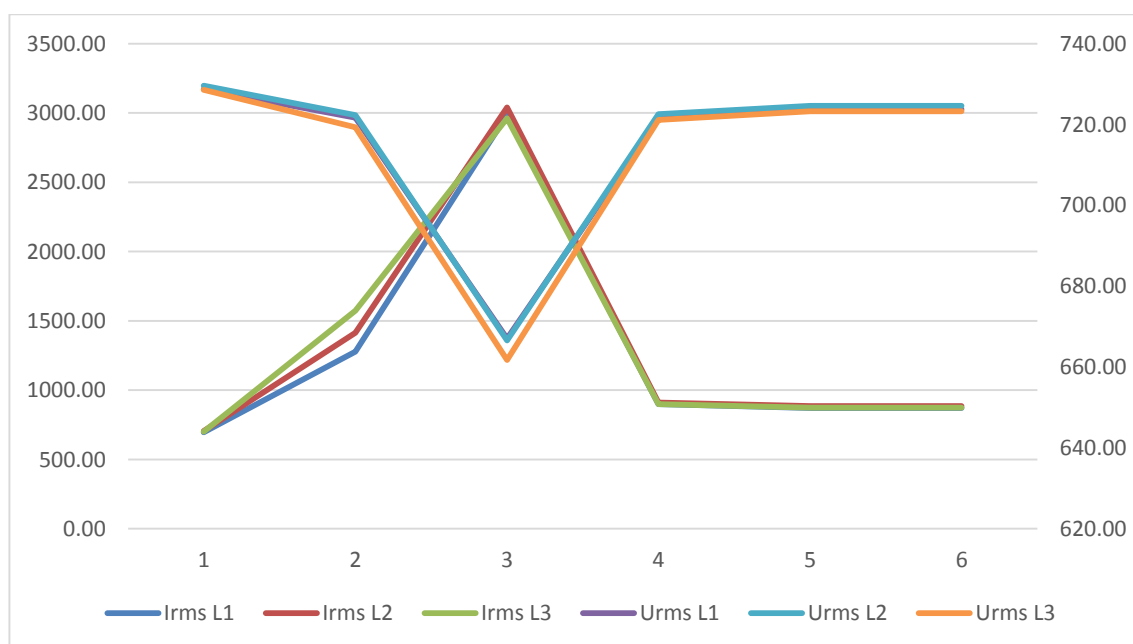


Kuvaaja 10) Toinen esimerkki keskuksen virran tehollisista arvoista moottorin käynnistyessä. Kuvaajan musta viiva esittää suurimpien tehollisarvojen kuvaajan mukaan tulkitsemaani virran käyrämuotoa.

Kuvaajassa 10 on esitelty toinen tyypillinen keskuksen virtakuvaaja moottorien käynnistyessä. Erona edelliseen kuvaajaan on suurimman virran tehollisarvojen kuvaajan tulkinnan pohjalta tehdyn oikea-aikaisen virtakuvaajan parempi yhtyminen kuvaajan pisteessä 4. Tämä tarkoittaa, ettei kyseisen moottorin käynnistyessä ole tapahtunut yhtä voimakasta virran vaihtelua mittausvälien sisällä, kuin kuvaajassa 9 esitetyssä käynnistymistilanteessa. Koska molemmissa kuvaajissa moottorin käynnistymisvirta on ollut yhtä suuri ja käynnistymisen yhteydessä tapahtuva virranvaihtelu poikkeaa kuvaajien välillä suuresti toisistaan, ei virranvaihtelu johdu virtamuuntajien saturoitumisesta ja käynnistymisen yhteydessä mitattuja virran arvoja voidaan pitää edustavina todellisista keskuksen arvoista.

5.3 Jännitteenalenemat

Tarkistetaan seuraavaksi kolmivaiheisten mittauksien avulla aiemmin laskemani keskusten oikosulkuimpedanssin suuruus vertaamalla kuvaajan 11 jännitteenalenemia samalle hetkelle lasketun oikosulkuimpedanssin avulla saatavaan jännitteenalenamaan.



Kuvaaja 11) Keskuksen +641E344 jännitteiden ja virtojen tehollisarvot yhden moottorin käynnistyshetkellä

Kolmivaiheisen järjestelmän jännitteenaleneman U_a likiarvo lasketaan kaavalla 22.

$$U_a = \sqrt{3}(I_R * R + I_X * X) \quad (22)$$

jossa I_R = resistiivinen virtakomponentti

R = syöttöverkon resistanssi

I_X = reaktiivinen virtakomponentti

X = syöttöverkon reaktanssi

Kaavoista 13 ja 14 saadaan oikosulkuimpedanssin resistiiviset ja induktiiviset komponentit. Virtapiikin suuruus valitussa mittauspisteessä oli 2975 A ja tehokerroin samalla hetkellä 0,47.

$$I_R = 0,47 * 2975 \text{ A} = 1398 \text{ A} \quad (23)$$

$$I_X = \sin(\cos^{-1} 0,47) * 2975 \text{ A} = 2618 \text{ A} \quad (24)$$

Lasketaan ensin kokonaisjännitteenalenema käynnistysvirtapiikin aikana.

$$U_a = \sqrt{3} * (1398 \text{ A} * 0,001014 \Omega + 2618 \text{ A} * 0,011507 \Omega) = 54,63 \text{ V} \quad (25)$$

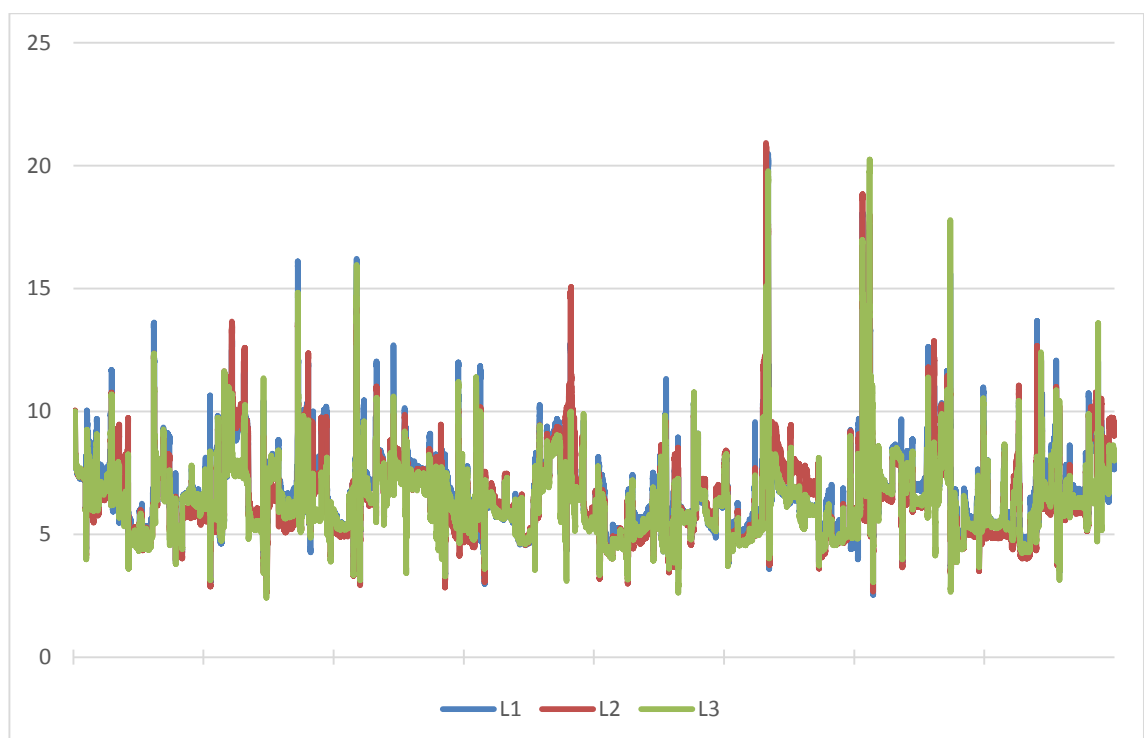
Vertailuarvoksi lasketaan jännitteenalenema juuri ennen virtapiikkiä. Tuolloin kuvan 11 mukaan keskuksen virta oli 700 A ja tehokerroin 1.

$$U_a = \sqrt{3} * (700 \text{ A} * 0,001014 \Omega) = 1,23 \text{ V} \quad (26)$$

Virtapiikin aikana keskuksen jännite aleni oikosulkuimpedanssien avulla laskettuna noin 53 V ja kuvaajasta 7 luettuna noin 62 V. Suurusluokaltaan molemmat laskutavat ovat verrattain lähellä toisiaan. Eron selittänevät mittauksen epätarkkuudet ja virtamuuntajien aiheuttamat vaihekulmavirheet, jotka vääristävät mitattuja tehokerrointen arvoja [9].

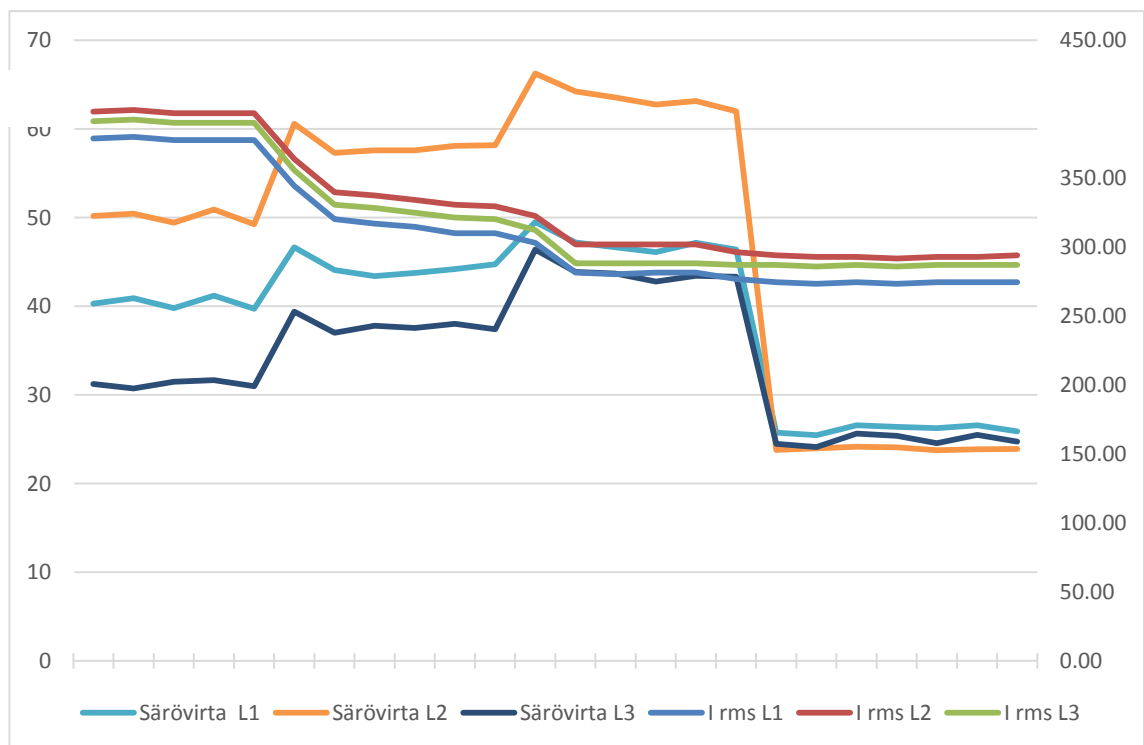
5.4 Särövirrat

Viimeiseksi tarkastellaan kolmivaihemittauksessa saatuja keskusten särövirtoja. Kuvaajassa 12 on esitelty keskuksen +641E344 virran kokonaisharmonisen särön kuvaajat mittauksen ensimmäisiltä kahdeksalta tunnilta.



Kuvaaja 12) Keskuksen +641E344 virran kokonaisharmoninen särö (THDr%) prosentteina tehollisarvosta

Kuvaajasta 12 nähdään harmonisen särön pysyttelevän alle kymmenessä prosentissa kohoten moottoreiden käynnistyshetkillä 15- 20 % lukemiin. Lisäksi havaitaan, että kaksi suurinta säröpiikkiä ovat olleet muita pitkäkestoisempia kestäessään useita sekunteja. Kuvaajassa 13 tarkastellaan tarkemmin virtaa tuon pidempikestoisen säröpiikin aikana.



Kuvaaja 13) Keskukseen +641E344 virran ja särövirran kuvaajat kuvaajan 12 särövirtapiikin aikana

Näemme kuvaajasta 13, että keskuksen kokonaisvirran pienentyessä särövirta samalla kasvaa. Keskukseen kuorman pienentyessä tapahtuva harmonisten särövirtojen kasvaminen viittaisi kondensointiparistojen resonoimiseen jonkin harmonisen yliaallon kanssa [9]. Kyseessä ei siis ole moottorin käynnistyshetkellä tapahtuva yliaaltopiikki, eikä särövirta kasva kyseisellä ajankohdalla merkittävästi, joten yliaaltojen osallisuus keskuksessa ja keskusten kiskoissa kuultaviin ääniin voidaan sulkea pois.

5.5 Virtapiikkejä aiheuttavat moottorit

Mittauksien perusteella suurimpien, kahdeksan kiloampeerin huippuvirtapiikeillä käynnistyvien, moottoreiden käynnistyessä keskuksen kuormavirta kasvaa kuvaajan 8 mukaan 160–300 A. Tuolle kuormavirtavälille asettuvia moottorit ovat nimellisteholtaan vähintään 250 kW tehoisia ja niitä on keskuksessa +641E344 taulukon 1 mukaan viisi kappaletta ja keskuksessa +641E342 neljä kappaletta.

Luvussa 5.1 kiinnitin huomiota keskuksien välisestä erosta yli kahden kiloampeerin virtapiikkien aiheuttavista käynnistymisistä ja huomasin keskuksessa +641E344 tapahtuvan kaksinkertaisen määrän moottorikäynnistyksiä keskukseseen +641E342 nähden. Taulukoiden 1 ja 2 mukaan keskuksessa +641E344 on kaksi 400 kW moottoria ja keskuksessa +641E342 on yksi samanlaista kuormaa pyörittävä moottori. Virtapiikkien suhteellinen osuus keskusten välillä näyttäisi siis vastavan 400 kW moottoreiden määrää keskuksessa ja on erittäin todennäköistä suurimpien virtapiikkien syntyvän juuri noista kolmesta moottorista. Asiasta varmistuminen vaatisi virtamittausten vertaamista keittämön prosessiautomaation lokitietoihin samalta ajanjaksolta, mikä edellyttäisi tässä tapauksessa uusia mittauksia ja siksi jätetään tämän työn puitteissa suorittamatta aikataulullisista syistä.

6 Johtopäätökset

6.1 Käynnistysvirtojen vaikutukset

Mittauksien perusteella suurimpien moottoreiden käynnistäminen aiheuttaa keskuksen pääjännitteen alenemisen käynnistyshetkellä noin kuudellakymmenellä voltilla. Prosentteina tuo jännitteenalenema on 690 V keskuksessa vain 8,7 prosenttia, joka ei standardin SFS-EN 50160 mukaan pidetä jännitekuoppana, joten muiden keskuksista syöttönsä saavien moottoreiden tulisi kestää suuritehoisten moottoreiden käynnistyessä esiintyvät jännitteenalenemat ilman käyttöiän lyhenemistä [13].

Harmoniset yliaaltovirrat vaikuttavat kasvavan moottorien käynnistyshetkillä vain merkityksettömän suuruisen määrän keskuksen kokonaisvirtaan nähden, eikä keskuksen jännitesäro muutu yhdenkään mittauksen aikana merkittävästi. Yliaaltojen osallisuus moottoreiden käynnistyshetkellä kuultaviin ääniin voidaan näin sulkea pois.

Suurimpien moottoreiden käynnistyshetkillä tapahtuvat, jopa kahdeksaan kiloampeeriin yltävät virtapiikit jäävät tällöin ainoaksi mahdolliseksi sähköiseksi syyksi keskusten kiskoista kuuluviin ääniin. Tällöin ääni syntyy kiskojen tai ympäröivien metallirakenteiden värähtelystä magneettisten voimien vaikutuksesta.

6.2 Vaikutukset kiskostoihin

Kiskostoista ei löytynyt teknistä dokumenttia ja tämän työn aikaikkunan puitteissa ei ollut mahdollista tehdä keskuksia turvallisesti jännitteettömäksi kiskoston mekaanisen rakenteen tutkimiseksi, joten en pysty tarkemmin arvioimaan kiskostojen mekaanisen toteutuksen osuutta kuultujen äänien synnylle ja äänen syntymekanismin mahdollisille mekaanisille vaikutuksille kiskostoissa.

Kiskostojen tulisi olla suunniteltu ja valmistettu kestäämään keskuksessa tapahtuvan kolmivaiheisen oikosulun aiheuttaman virran dynaamiset rasitukset ja olla tuettu riittävän hyvin kiskoresonanssin välttämiseksi [9]. Koska kiskoston värähtelyn mahdollisuutta ei näillä mittauksilla saatu suljettua pois ei ole poissuljettua, että pitkällä aikavälillä kiskojen mekaaniset liitokset ja kiinnitykset pääsevät löystymään värähtelyn vuoksi johtaen lopulta kiskojen väliseen oikosulkuun.

6.3 Käynnistysvirran rajoittaminen pehmokäynnistimillä

Työssä tutkittavana ollut ääni johtuu alkuperäisen olettan mukaisesti keskusten moottoreiden suurista käynnistysvirroista, joten järkevin tapa kiskostoihin kohdistuvan mekaanisen rasituksen vähentämiseksi on noiden

virtojen alentaminen. Virranrajoitus voidaan toteuttaa kyseisissä keskuksissa käytännössä ainoastaan pehmokäynnistimillä, sillä käytetty jännite estää tähtikolmikäynnistyksen ja taajuusmuuttajien yliaaltotuotanto edellyttäisi erillisten suodattimien hankkimista keskuksiin.

Pehmokäynnistyksessä moottoreille syötettävää vaihtojännitettä kytketään päälle puolijohdekomponentein vain osan siniaallon kellojakson ajan, jolloin moottorin yli vaikuttava vaihtojännite on merkittävästi verkon nimellisjännitettä pienempi jolloin myös virta pienenee. Käynnistyksen edetessä jännite kytketään päälle entistä pidemmiksi ajoiksi, kunnes lopulta moottori saa jännitettä koko vaihtovirtajakson ajan eikä tilanne poikkea mitenkään kontaktorilla käynnistetyistä moottorista. Pehmokäynnistimellä käynnistettäessä moottorin käynnistysmomentti pienenee huomattavasti. Työn keskusten pumppukuormilla vastamomentti on alussa hyvin pieni kasvaen vasta pyörimisnopeuden kasvaessa, eikä alhainen käynnistysmomentti siten aiheuta ongelmia. [14].

Tarvittavien pehmokäynnistimien määrän arvioimiseksi tulisi varmistaa luvussa 5.5 tekemäni havainto mahdollisesta korrelaatiosta 400 kW:n moottoreiden ja keskuksien suurimpien käynnistysvirtapiikkien välillä. Jos havainto pitää paikkansa, vain nuo kolme moottorilähtöä tarvitsisi varustaa pehmokäynnistimin ja keskuksen suurimmat huippuvirrat pienenevät kuvaajien 7 ja 8 perusteella kahdeksasta kiloampeerista noin kolmeen kiloampeeriin. Pahimmassa tapauksessa, jos tuo havaintoni osoittautuu pitämättömäksi, tarvitaan keskuksiin asentaa yhteensä yhdeksään lähtöön pehmokäynnistimet.

6.4 Pehmokäynnistimien haittapuolet

Pehmokäynnistimen huonona puolena on moottorin käynnistyksen aikana syntyvät särövirrat, koska käynnistin pätkii siniaaltoja muualta kuin virran nollakohdasta. Yliaaltovirtojen suuruus ja kesto kasvavat huomattavasti nykyisestä pehmokäynnistimillä varustettujen moottoreiden käynnistyessä, mutta taajuusmuuttajista poiketen pehmokäynnistin ei aiheuta moottorin käynnistyttyä verkkoon lainkaan yliaaltoja. [14].

Käynnistyshetkien yliaaltopitoisuuden nousu pehmokäynnistysten yhteydessä saattaa edellyttää laitteiden virhetoimintojen välttämiseksi yliaaltosuodattimien asentamista keskuksiin, jolloin saadaan samalla vähennettyä muista lähteistä syntyviä keskusten yliaaltovirtoja. Muutoin keskukseen ei ole kannattavaa asentaa yliaaltosuodattimia, koska kuvaajien 4 ja 13 perusteella keskuksissa kulkevat särövirrat ovat tehollisarvoltaan pääosin alle 60 A.

6.5 Pohdinta

Toimeksiannossa asetetut tavoitteet opinnäytetyölle toteutuivat vain osittain, koska en pystynyt pääasiassa dokumentaation puutteen vuoksi ottamaan kantaa kiskosten mekaaniseen kestävyyteen. Toisen toimeksiannon tavoitteen, eli käynnistysvirtojen aiheuttamien jännitekuoppien haittavaikutusten arvioinnin saavutin kohtalaisen hyvin. Tuon tavoitteen saavutin johtopäätöksellä, että jännitteenalenema on standardin sallimissa jänniterajoissa, eikä sen tulisi aiheuttaa häiriötä muille keskusten syöttämille moottoreille. Arvioin pehmokäynnistimien olevan paras keino vähentää käynnistysvirtoja keskuksissa, mutta käynnistimistä saatavan hyödyn selvittämiseksi ja yliaaltosuodatuksen tehostamistarpeen arvioimiseksi tulisi tehdä lisäselvityksiä.

Jos lähtisin nyt tutkimaan vastaavaa ongelmaa, niin ottaisin asiaan hieman laajemman näkökannan pelkkien sähkönlaatumittausten lisäksi ja pyrkisin selvittämään joko teknisistä dokumenteista tai sopivissa oloissa visuaalisesti tarkastelemalla jännitteettömän kiskoston rakennetta. Lisäksi käyttäisin mittauksissa yleisen sähkönlaadun mittatoiminnon lisäksi käynnistysvirran mittatoimintoa, joka antaa paljon tarkemman käsityksen keskuksen virrasta moottoreiden käynnistyshetkillä. Kolmas lisä, jonka tekisin toisin, olisi hankkia mittausten tueksi prosessiautomaatiojärjestelmästä loki mittausjakson ajalta käynnissä olevista moottoreista. Tuolloin voisin yksilöidä mittauksista tekemäni havainnot yksittäisiin moottoreihin.

Lähteet

1. Hassinen, T. Voimalaitoksen taajuusmuuttajakeskuksen jännitetaso revision aikana. Karelia-amk. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. 2012.
2. Tehdasesittely. Enocell Oy. 2014.
3. Jaakko Pöyry Oy. 110/10 kV pääkaavio. 1992.
4. Hassinen, T. Luotettavuusinsinööri. Haastattelu. Efora Oy. Lokakuu 2014.
5. Jaakko Pöyry Oy. Keskuserittely 641E342. 1993.
6. Jaakko Pöyry Oy. Keskuserittely 641E344. 1993.
7. Makkonen, T. Jännitekuoppien vaikutus oikosulkumoottorien käyttäytymiseen. Karelia-amk. 2014.
8. Prysmian Group. AHXAMK-W 10 kV 3-johtiminen. 2013.
9. ABB Oy. Teknisiä tietoja ja taulukoita- käsikirja. 2000.
10. ABB Oy. Tekninen opas nro 6 - Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. 2001. [Viitattu 1.3.2015]. Saatavissa: [http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$file/Tekninen_opas_nro_6.pdf](http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$file/Tekninen_opas_nro_6.pdf).
11. Toliyat, H. A. & Kliman, G. B. Handbook of Electric Motors. CRC Press. 2004.
12. Holst, S & Zakonjšek, J. Transient behaviour of conventional current transformers used as primary transducers and input element. 2013. [Viitattu 10.1.2015]. Saatavissa: [http://www08.abb.com/global/scot/scot400.nsf/veritydisplay/2a82c599d50bdfecc1257c16003117b6/\\$file/1MRG014323_en_Transient_Behaviour_of_Conventional_Current_Transformers_used_as_Primary_Transducers_and_Input_Elements_.pdf](http://www08.abb.com/global/scot/scot400.nsf/veritydisplay/2a82c599d50bdfecc1257c16003117b6/$file/1MRG014323_en_Transient_Behaviour_of_Conventional_Current_Transformers_used_as_Primary_Transducers_and_Input_Elements_.pdf).
13. Suomen standardoimisliitto SFS ry. SFS-EN 50160. 2000.